

PENENTUAN KADAR URANIUM DALAM SERBUK UO_2 DARI *YELLOW CAKE* SECARA POTENSIOMETRI DAN GRAVIMETRI

Lilis Windaryati, Ngatijo, Pranjono, Torowati

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN, Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan 15314, Email: liliswindaryati@batan.go.id

ABSTRAK

PENENTUAN KADAR URANIUM DALAM SERBUK UO_2 DARI *YELLOW CAKE* SECARA POTENSIOMETRI DAN GRAVIMETRI. Telah dilakukan penentuan kadar uranium dalam serbuk UO_2 dari *yellow cake* yang berasal dari Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir (PTBGN). Serbuk UO_2 yang ditentukan kadar uraniumnya merupakan hasil konversi *yellow cake* melalui jalur amonium diuranat (ADU) dan amonium uranil karbonat (AUK). Dalam penentuan kadar uranium diperlukan suatu metode yang valid sehingga diperoleh data yang akurat. Dalam kegiatan ini dibandingkan dua metode penentuan kadar uranium dalam serbuk UO_2 , yaitu secara potensiometri dan secara gravimetri. Tujuannya untuk menentukan mana metode yang memberikan hasil dengan ketelitian dan presisi tinggi. Penentuan kadar uranium secara potensiometri mengacu kepada ASTM C1267-11 yang dimodifikasi dengan mereduksi pemakaian pereaksi menjadi 10% dari metode asli, sedangkan metode gravimetri mengacu kepada ASTM C1453-00 (2011). Penentuan kadar uranium secara potensiometri berdasarkan oksidasi-reduksi, sedangkan secara gravimetri berdasarkan perubahan berat setelah serbuk UO_2 dikalsinasi pada temperatur 900°C selama 3 jam hingga diperoleh berat konstan. Dari kegiatan ini diperoleh hasil rerata untuk penentuan kadar uranium dalam serbuk UO_2 melalui jalur ADU dan AUK secara potensiometri masing-masing adalah $(87,4019 \pm 0,7873) \%$ dan $(87,5575 \pm 0,4775) \%$, sedangkan secara gravimetri masing-masing adalah $(87,5241 \pm 0,0432) \%$ dan $(87,4492 \pm 0,0440) \%$. Uji t dari kedua metode menunjukkan bahwa hasil penentuan kadar uranium tidak mempunyai perbedaan yang signifikan. Oleh sebab itu, penentuan kadar uranium dalam serbuk UO_2 pada penelitian berikutnya digunakan metode gravimetri karena lebih mudah tahapan pengerjaannya dibandingkan dengan metode potensiometri.

Kata kunci: *yellow cake*, potensiometri, gravimetri

ABSTRACT

DETERMINATION OF URANIUM CONTENTS IN UO_2 POWDER BASED ON YELLOW CAKE BY POTENTIOMETRIC AND GRAVIMETRIC METHODS. Determination of uranium content in UO_2 powder based on yellow cake originated from Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir (PTBGN) has been done. The UO_2 powder was converted from yellow cake through ammonium diuranate (ADU) and ammonium uranyl carbonate (AUC) processes. The determination process requires a valid method to achieve data accurately. Two methods were investigated, i.e. potentiometric and gravimetric methods. The potentiometric method was referring to ASTM C1267-11 with some modification in which the reagent was reduced to 10% from the original method, while the gravimetric method was referring to ASTM C1453-00(2011). The potentiometric method was based on the oxidation-reduction, while the gravimetric method was based on the weight changes after the UO_2 powder was calcinated at 900°C for 3 hours until the constant weight achieved. Results showed that the average of uranium content in UO_2 powder based on ADU and AUC process was at $(87,4019 \pm 0,7873) \%$ and $(87,5575 \pm 0,4775) \%$ by the potentiometric method, and at $(87,5241 \pm 0,0432) \%$ and $(87,4492 \pm 0,0440) \%$ by the gravimetric method. The T test of the two methods showed no significant differences. It is suggested that future work in uranium content determination use the gravimetric method since the steps are much simpler compared to the potentiometric method.

Keywords: *Yellow cake*, potentiometric, gravimetric

PENDAHULUAN

Dalam rangka memenuhi kebutuhan energi di masa mendatang, BATAN menyusun kegiatan untuk program jangka panjang yaitu pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).

Program tersebut memerlukan penguasaan teknologi terutama untuk fabrikasi elemen bakar nuklir.

Kegiatan di Instalasi Elemen Bakar Eksperimental (IEBE) saat ini meliputi penelitian dan pengembangan fabrikasi elemen bakar nuklir untuk reaktor tipe PWR (*Pressurized Water Reactor*). Bahan nuklir utama yang digunakan dalam fabrikasi elemen bakar nuklir untuk reaktor tipe PWR adalah pelet uranium dioksida (UO_2). Pelet dibuat dari serbuk UO_2 berderajat nuklir dan memenuhi persyaratan yang telah ditetapkan untuk bahan bakar reaktor nuklir.

Serbuk UO_2 dapat diperoleh secara komersial atau proses konversi dari *yellow cake* (YC). Ada beberapa jenis *yellow cake* sebagai bahan utama dalam proses konversi yaitu *yellow cake* komersial (YC Cogema), *yellow cake* hasil limbah pupuk fosfat dari PT Petrokimia Gresik (YC PKG), dan *yellow cake* Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir (PTBGN) yang merupakan *yellow cake* dari bahan galian Kalan, Kalimantan Barat.

Teknologi konversi *yellow cake* menjadi serbuk UO_2 telah lama diketahui dan telah banyak dilakukan baik dalam skala laboratorium maupun skala industri. Konversi *yellow cake* dapat dilakukan melalui proses basah maupun proses kering [1, 2]. Proses basah dibagi lagi menjadi beberapa tipe, di antaranya adalah jalur amonium diuranat (ADU) dan jalur amonium uranil karbonat (AUK).

Di IEBE telah dilakukan secara laboratorium proses konversi *yellow cake* yang berasal dari PTBGN menjadi serbuk UO_2 . *Yellow cake* ini berasal dari bahan galian nuklir khususnya yang mengandung uranium dan banyak terdapat di cekungan Kalan, Kalimantan Barat [3]. Bahan dari galian Kalan ini telah berhasil dilakukan pengolahan kadar uraniumnya oleh PTBGN menjadi *yellow cake*.

Proses konversi *yellow cake* meliputi proses pelarutan, pemurnian, pengendapan dan kalsinasi. Proses pengendapan dapat dilakukan melalui jalur amonium diuranat (ADU) atau

amonium uranil karbonat (AUK). ADU dihasilkan dari proses pengendapan dengan bahan pengendap amonium hidroksida, sedangkan AUK diperoleh dengan bahan amonium karbonat [4,5]. Endapan ADU dan AUK dikalsinasi hingga terbentuk serbuk UO_2 yang diharapkan berderajat nuklir.

Untuk mengetahui bahwa serbuk tersebut berderajat nuklir atau tidak, perlu dilakukan pengujian kendali kualitas dengan metode yang mampu menghasilkan data akurat. Salah satu pengujian yang dilakukan adalah penentuan kadar uranium. Penentuan kadar uranium dapat dilakukan dengan beberapa cara, di antaranya secara potensiometri dan gravimetri atau menggunakan UV-Vis.

Dalam kegiatan ini dilakukan penentuan kadar uranium dalam serbuk UO_2 yang dihasilkan melalui jalur ADU dan AUK. Penentuan dilakukan dengan dua metode, yaitu secara potensiometri dan secara gravimetri. Tujuan kegiatan ini adalah untuk menentukan manakah dari kedua metode analisis tersebut yang memberikan hasil lebih akurat.

TEORI

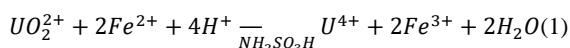
Penentuan Kadar Uranium Secara Potensiometri

Metode potensiometri merupakan metode analisis titrimetri yang berdasarkan pada perubahan potensial elektroda dalam larutan yang dianalisis. Metode potensiometri secara umum digunakan untuk menentukan konsentrasi suatu ion (*ion selective electrode*), pH suatu larutan, dan titik akhir titrasi. Metode titrimetri potensiometri yang digunakan untuk menganalisis kadar uranium ialah potensiometri Davies-Gray. Metode ini digunakan untuk menentukan unsur-unsur kimia dalam larutan secara kuantitatif. Potensiometer ini dilengkapi dengan potensiometer titraliser yang berfungsi untuk mengetahui perubahan potensial secara elektronik hingga terjadinya titik ekuivalen secara akurat dapat ditentukan [6].

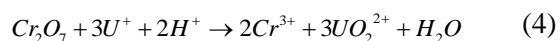
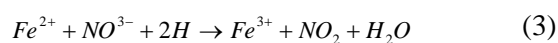
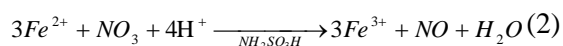
Bahan serbuk UO_2 dalam bentuk ion UO^{2+} direduksi menjadi ion U^{4+} dengan penambahan ion Fe^{2+} dalam jumlah berlebihan di dalam medium asam fosfat pekat. Kelebihan ion Fe^{2+} dioksidasi secara selektif oleh asam nitrat dengan bantuan molibdenum sebagai katalisator. Ion U^{4+} dioksidasi dengan larutan standar $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, sebelum titrasi dilakukan

ditambahkan vanadium. Elektroda yang digunakan dalam potensiometer ini adalah elektroda platina (Pt). Setelah titik ekuivalen dicapai, yang ditandai dengan terjadinya perubahan potensial yang cepat (400–600 mV), titrasi secara otomatis akan berhenti. Hasilnya diperoleh dari pencatatan alat dalam gram/liter uranium.

Tahap-tahap reaksi yang terjadi adalah [6]:



Mo(VI) katalis



Kadar uranium dapat diketahui langsung dari pembacaan pada alat berdasarkan Persamaan (5):

$$U(g/L) = \frac{119 \cdot V \cdot N \cdot f}{V_c \cdot F_p} \quad (5)$$

dengan:

U = kadar uranium, g/L

V = volume titran $K_2Cr_2O_7$, ml

N = Normalitas $K_2Cr_2O_7$, g/L

F = faktor koreksi alat

V_c = volume sampel, ml

F_p = faktor pemekatan

119 = bobot ekuivalen dari uranium, g/grek

Peralatan potensiometri yang digunakan untuk menganalisis kandungan uranium berada di laboratorium IEBE seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Potensiometer Metler Toledo T90



Gambar 2. Tungku

Penentuan Kadar Uranium Secara Gravimetri

Metode gravimetri didasarkan atas pengukuran perubahan berat setelah proses pemanasan. Dalam kegiatan ini pemanasan dilakukan pada suhu tinggi (kalsinasi). Kalsinasi dilakukan pada temperatur 900 °C selama 3 jam di dalam tungku [7] seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Prinsip dari analisis gravimetri adalah oksidasi UO_2 menjadi U_3O_8 . Melalui pemanasan pada suhu dan waktu tersebut diharapkan akan terbentuk senyawa U_3O_8 keseluruhan. Metode yang digunakan mengacu kepada ASTM 1453-00 (2011). Rumus yang digunakan untuk mendapatkan persentase U ditunjukkan pada Persamaan (6).

$$\%U = [(0,8480(W - WI)/S \times 100)] - C \quad (6)$$

dengan :

0,8480 = perbandingan berat atom U dan berat molekul U_3O_8

W = berat U_3O_8 setelah pemanasan

S = berat sampel awal

I = berat total kadar pengotor setelah pemanasan

C = berat total kadar pengotor yang kurang dari limit deteksi terendah (0,01 %)

METODOLOGI

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian adalah serbuk UO_2 dari *yellow cake* PTBGN yang diperoleh melalui jalur ADU dan AUK, standar U_3O_8 , asam nitrat pekat, asam fosfat pekat, asam sulfat pekat, asam amido sulfonat, ferro sulfat, amonium heptamolibdat, vanadil sulfat, kalium bikromat, dan air destilasi.

Peralatan

Peralatan yang digunakan adalah seperangkat alat potensiometer merk Metler Toledo T90, *beaker* gelas, labu ukur, corong, pengaduk magnet, pemanas listrik, timbangan analitik, pipet, cawan porselin, tungku, desikator, dan sendok.

Tata Kerja

Penentuan Secara Gravimetri

Sampel *yellow cake* dengan berat 2–12 gram dimasukkan ke dalam cawan porselin, lalu dimasukkan ke dalam tungku dan dipanaskan untuk proses kalsinasi pada temperatur 900 °C selama 3 jam. Kemudian, cawan dimasukkan kedalam desikator hingga mencapai suhu kamar, lalu ditimbang. Proses kalsinasi diulangi sampai diperoleh berat konstan [6].

Penentuan Secara Potensiometri

(a) Preparasi larutan pereaksi. Dibuat larutan asam sulfamat 1,5 M dengan cara menimbang 15 gr asam sulfat yang kemudian dilarutkan dengan air destilat menjadi 100 ml. Dibuat larutan ferro sulfat 1 M dengan cara menimbang 28 gr serbuk ferro sulfat, ditambah 10 ml asam sulfat pekat, kemudian volume ditepatkan menjadi 100 ml dengan air destilasi. Dibuat larutan amonium heptamolibdat 0,4% dengan cara menimbang 0,4 gr amonium heptamolibdat, ditambah 50 ml asam nitrat pekat, kemudian ditepatkan volumenya menjadi 100 ml dengan air destilat.

Dibuat larutan vanadil sulfat 0,1% dengan cara menimbang 1,25 gr, ditambah 5 ml asam sulfat pekat, dan ditepatkan volumenya menjadi 100 ml dengan air destilasi. Dilakukan pembuatan larutan 0,027 N kalium bikromat dengan cara menimbang 1,324 gr kalium bikromat yang lalu dilarutkan dalam 1 liter air destilasi.

(b) Pembuatan larutan standar U_3O_8 , larutan serbuk UO_2 *yellow cake* PTBGN melalui jalur ADU dan AUK. Dibuat larutan masing-masing dengan cara menimbang $\pm 0,1$ gr, ditambah 5 ml asam nitrat pekat, kemudian dipanaskan hingga larut sempurna dan ditepatkan volumenya menjadi 10 ml dengan menambahkan air destilasi.

(c) Analisis kadar uranium menggunakan alat potensiometer. Ke dalam masing-masing 7 *beaker* gelas diisi 1 ml larutan uranil nitrat dari standar U_3O_8 , serbuk UO_2 *yellow cake* PTBGN, ditambahkan 1 ml asam sulfat 1 M,

kemudian dipanaskan sampai kering untuk menghilangkan unsur-unsur pengotornya. Setelah kering, dilarutkan dengan 1 ml asam nitrat pekat, lalu dipanaskan sampai tisd. Setelah dingin, ditambahkan asam sulfamat dan asam fosfat pekat, diaduk hingga berwarna putih keruh, kemudian ditambahkan larutan ferro sulfat dan amonium heptamolibdat sambil diaduk hingga larutan yang semula berwarna coklat tua berubah menjadi jernih. Setelah larutan jernih, ditambahkan larutan vanadil sulfat. Larutan kemudian dititrisi dengan menggunakan kalium bikromat konsentrasi 0,025 N [7].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Telah dilakukan penentuan kadar uranium dalam serbuk reduksi UO_2 dari *yellow cake* PTBGN melalui jalur ADU dan AUK secara gravimetri dan potensiometri. Hasil pemanasan serbuk UO_2 dari *yellow cake* PTBGN melalui jalur ADU secara gravimetri ditunjukkan pada Tabel 1. Hasil pemanasan serbuk UO_2 dari *yellow cake* PTBGN melalui jalur AUK secara gravimetri ditunjukkan pada Tabel 2. Hasil analisis uranium serbuk UO_2 dari *yellow cake* PTBGN melalui jalur ADU dan AUK secara gravimetri ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 1. Hasil Penimbangan Serbuk UO_2 dari *Yellow Cake* PTBGN Melalui Jalur ADU secara Gravimetri.

Sampel	Berat Awal (g)	Hasil 1 (g)	Hasil 2 (g)	Hasil 3 (g)
1	2,6494	2,7323	2,7318	2,7316
2	2,7165	2,8036	2,8033	2,8031
3	2,5933	2,6773	2,6769	2,6767
4	2,6863	2,7720	2,7717	2,7716
5	2,5641	2,6451	2,6448	2,6446
6	3,5380	3,6471	3,6467	3,6466
7	3,1391	3,2386	3,2382	3,2380

Tabel 2. Hasil Penimbangan Serbuk UO_2 dari *Yellow Cake* PTBGN Melalui Jalur AUK secara Gravimetri

Sampel	Berat Awal (g)	Hasil pemanasan 1 (g)	Hasil pemanasan 2 (g)	Hasil pemanasan 3 (g)
1	2,6494	2,7323	2,7318	2,7316
2	2,7815	2,8677	2,8675	2,8672
3	2,9975	3,0896	3,0892	3,0890
4	2,9164	3,0096	3,0093	3,0090
5	2,5448	2,6259	2,6256	2,6254
6	2,9420	3,0361	3,0357	3,0355
7	2,9891	3,0837	3,0835	3,0832

Tabel 3. Hasil Analisis Kadar Uranium dalam Serbuk UO_2 dari *Yellow Cake* PTBGN Melalui Jalur ADU dan AUK secara Gravimetri

No	Nama Bahan	Kadar Uranium (%)	Keterangan
1.	Serbuk UO_2 yellow cake PTBGN (jalur ADU)	87,4834	Rerata = 87,5241
		87,5576	SD = 0,0432
		87,5808	RSD = 0.0494
		87,5476	
		87,5166	
		87,4561	
2.	Serbuk UO_2 yellow cake PTBGN (jalur AUK)	87,5265	
		87,4118	Rerata = 87,4492
		87,4108	SD = 0,0447
		87,3866	RSD = 0.0511
		87,4906	
		87,4839	
		87,4931	
		87,4676	

Dari pemanasan serbuk UO_2 *yellow cake* PTBGN dengan 3 kali pengulangan sudah diperoleh berat konstan. Kadar uranium dihitung dari hasil penimbangan yang terakhir, ditentukan dengan menggunakan Persamaan (5) dengan memasukkan faktor besaran unsur-unsur pengotor yang terdapat di dalam serbuk UO_2 tersebut. Unsur-unsur pengotor terdiri dari unsur Al, Ca, Mg, Co, Cr, Fe, Zn, Mn, Cu, dan lain-lain. Hasil analisis menunjukkan kadar pengotor dalam serbuk UO_2 dari *yellow cake* PTBGN yang telah dilakukan sebesar 741,1400 ppm (jalur ADU) dan 635,6863 ppm (jalur AUK) [8].

Dari perhitungan tersebut diperoleh hasil kadar uranium dalam serbuk UO_2 dari jalur ADU dan AUK masing-masing adalah $(87,5241 \pm 0,0432)\%$ dan $(87,4492 \pm 0,0447)\%$ dengan nilai RSD masing-masing sebesar 0,0494% dan 0,0511%. Kadar uranium yang diperoleh tersebut menunjukkan bahwa metode yang digunakan mempunyai akurasi yang tinggi.

Penentuan kadar uranium secara potensiometri selalu menggunakan uranium standar bersertifikat/CRM. Hal ini untuk digunakan. Kadar uranium yang tertera pada sertifikat (CRM) adalah 84,7698%. Hasil analisis kadar uranium dalam uranium standar (CRM U_3O_8) dengan metode titrasi potensiometri seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Analisis Kadar Uranium dalam Larutan Uranium Standar CRM U_3O_8 .

Ulangan ke-	Kadar U teoritis (g/L)	Kadar U terukur (g/L)	Kadar U (%)
1	10,1300	10,2301	10,2301
2	10,1300	10,1561	84,9883
3	10,1300	10,1607	85,0268
4	10,1300	10,2729	84,6812
5	10,1300	9,9676	85,9657
6	10,1300	10,1409	83,4109
7	10,1300	10,0059	84,8611
8	10,1300	10,0842	84,3866
Rata-rata			84,7399
SD			0,8159
RSD			0,9628
Akurasi			0,0353
Fk			1,0004

Tabel 4 menunjukkan bahwa hasil analisis kadar uranium rerata dalam uranium standar diperoleh sebesar $(84,7399 \pm 0,8159)\%$ dengan nilai relatif standar deviasi sebesar 0,9628% dan akurasi metode sebesar 0,0353%. Batas keberterimaan untuk akurasi apabila nilai akurasi kurang dari 5%, nilai keberterimaan presisi/RSD apabila nilai RSD lebih kecil dari nilai $2/3(\text{CV}_{\text{Horwitz}})$ [9]. Nilai $\text{CV}_{\text{Horwitz}}$ pada analisis kadar uranium standar diperoleh sebesar 2.0498% dan nilai $2/3(\text{CV}_{\text{Horwitz}})$ sebesar 1.3665%. Hal ini menunjukkan bahwa metode dan peralatan yang digunakan untuk analisis mempunyai ketelitian dan akurasi yang tinggi. Hasil kadar uranium dalam serbuk UO_2 *yellow cake* dari PTBGN melalui jalur ADU dan AUK dihitung menggunakan Persamaan (6) seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Analisis Kadar Uranium dalam *Yellow Cake* PTBGN Melalui Jalur ADU dan AUK secara Potensiometri

No	Nama Bahan	Kadar Uranium (%)	Keterangan
1.	Serbuk UO_2 yellow cake PTBGN (jalur ADU)	88,2902	Rerata = 87,4019
		87,0032	SD = 0,7873
		87,3094	
		86,2519	
		88,4941	
		87,5398	
2.	Serbuk UO_2 yellow cake PTBGN (jalur AUK)	86,9244	
		87,1927	Rerata = 87,5579
		87,5110	SD = 0,4775
		87,2328	
		87,4616	
		87,0795	
		87,3323	
		88,3323	

Pada Tabel 5 terlihat bahwa hasil analisis kadar uranium dalam serbuk UO_2 *Yellow Cake*

menggunakan metode potensiometri memberikan hasil dengan rerata $87,4029 \pm 0,7873$ % (jalur ADU) dan $87,5579 \pm 0,4775$ % (jalur AUK).

Untuk mengetahui adanya signifikansi hasil analisis dari kedua metode tersebut, dilakukan uji statistik perbandingan hasil dua metode menggunakan uji-*t* Student. Dari hasil perhitungan diperoleh nilai *t* terhitung lebih kecil, yaitu antara 0,0020 dan 0,3995, dibandingkan dengan nilai *t* tabel 2,4469. Statistik menunjukkan bahwa hasil analisis kedua metode tidak mempunyai perbedaan. Hasil tinjauan dari dua metode yang digunakan untuk penentuan kadar uranium dalam serbuk UO_2 tersebut memperlihatkan perbedaan, tetapi tidak signifikan. Metode gravimetri dapat dipilih karena tahapan pengerjaannya lebih mudah dibandingkan dengan metode potensiometri. Namun, jika sampel serbuk UO_2 yang dimiliki terbatas, maka digunakan metode potensiometri, karena membutuhkan lebih sedikit serbuk UO_2 dibandingkan metode gravimetri. Untuk sampel di atas 5 gram dapat digunakan metode gravimetri, untuk sampel yang kecil/sedikit (10–200 mgr) digunakan metode titrimetri potensiometri [10].

KESIMPULAN

Hasil analisis kadar uranium rerata dalam serbuk UO_2 dari *yellow cake* PTBGN dengan menggunakan metode potensiometri dari jalur ADU dan AUK masing-masing sebesar $(87,4019 \pm 0,7873)\%$ dan $(87,5575 \pm 0,4775)\%$, sedangkan secara gravimetri masing-masing sebesar $(87,5241 \pm 0,0432)\%$ dan $(87,4492 \pm 0,044)\%$ (jalur AUK). Kedua metode ini tidak mempunyai perbedaan yang signifikan. Maka penelitian berikutnya untuk penentuan kadar uranium dalam serbuk UO_2 dapat digunakan metode gravimetri karena lebih mudah tahapan pengerjaannya dibandingkan dengan metode potensiometri.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala PTBBN yang telah memberikan dana DIPA 2015 untuk membiayai penelitian ini. Tak lupa penulis mengucapkan terima kasih kepada semua personil di kelompok Kendali Kualitas serta semua pihak yang telah membantu hingga terlaksana dan selesainya kegiatan ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. B. Narasimha Murty, P. Balakrishna, R.B. Yadav, and C. Ganguly, Influence of temperature of precipitation on agglomeration and other powder characteristics of ammonium diuranate,” *Powder Technol.*, vol. 115, no. 2, 2001, pp.167–183,.
2. G. K. Suryaman and R. Langenati, Komparasi Sifat Kimia dan Fisik Serbuk UO_2 Hasil Konversi Yellow Cake Limbah Pupuk Fosfat dan Yellow Cake Komersial Melalui Jalur ADU, 2013, *J.Tek. Bahan Nuklir Vol 9 No.2*, 77–83.
3. E. R. Riza, Faizal; Nuri, Hafni Lisa; Arief, Pengolahan Uranium Menjadi Yellow Cake, 2006, Prosiding Seminar Nasional ke-12 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir Yogyakarta, 164–174.
4. Y.W. Lee and M.S. Yang, Characterization of HWR fuel pellets fabricated using UO_2 powders from different conversion processes, vol.178, 1991, 217–226,.
5. H. Tel and M. Eral, Investigation of production conditions and powder properties of AUC, *J. Nucl. Mater.*, vol. 231, no. 1–2, 1996,165–169,.
6. ASTM STANDARD, Designation C1453-00, “Standard Test Method for the Determination of Uranium by Ignition and Oxygen to Uranium (O/U) Atomic Ratio of Nuclear Grade Uranium Dioxide Powder & Pellets”, America Standard Institute, 2011.
7. ASTM STANDARD, Designation C1267 – 11, Uranium by Iron (II) Reduction in Phosphoric Acid Followed by Chromium (VI) Titration in the Presence of Vanadium¹, America Standard Institute, 2011.
8. Asminar dkk (2015), Rekaman Data Hasil Analisis Pengotor Menggunakan Spektrometri Serapan Atom, UO_2 Hasil Konversi Yellow Cake PTBGN, Serpong, 2015.
9. Yulia, “Validasi Metode”, Diklat Validasi Metode, Pusat Penelitian Kimia-LIPI, Bandung, 2010.
10. Noor Yudhi, “Validasi Metode Analisis Penentuan Kadar Air dan O/U Rasio dari Serbuk UO_2 dan Pelet Sinter Murni”, P2TBDU, 2010.